МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE







УДК 621.762.002
https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-338-345

Научная статья



Исследование процесса переработки конгломератов шлифовального шлама в устройствах с вращающимся электромагнитным полем

В. А. Лебедев, А. А. Ширин ✉, Н. С. Коваль, Ю. М. Вернигоров
Донской государственный технический университет, Российская Федерация, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1
✉ ANDREY.SHIRIN.94@yandex.ru

Аннотация
Введение. Ключевыми этапами технологии переработки шламов являются разрушение конгломератов на металлические и неметаллические компоненты, а также измельчение частиц компонентов для получения вторичного сырья требуемого гранулометрического состава. Применение вращающегося электромагнитного поля для переработки шлифовальных шламов позволяет исключить применение различных средств разрушения и измельчения, избегая контактного взаимодействия агломератов со стенками рабочей камеры. Таким образом снижается материалоёмкость технических средств и повышается эффективность процесса разрушения. Целью исследований являлось установление особенностей и основных закономерностей переработки шламовых отходов в устройствах с вращающимся электромагнитным полем.
Материалы и методы. Для исследований использовался шлифовальный шлам, представляющий собой совокупность конгломератов произвольной формы, состоящих на 80–85 % из металлической стружки. Применен индукционный метод, основанный на установлении связи ЭДС, наводимой в индукционном датчике с магнитной индукцией вращающегося электромагнитного поля. Оценка влияния индукции на характер взаимодействия между частицами шлама во вращающемся электромагнитном поле проводилась по изменению относительного сигнала ЭДС, наведенного в индуктивном датчике.
Результаты исследования. В результате проведенных с применением индукционного метода экспериментальных исследований установлено: динамические характеристики конгломератов шламовых отходов зависят от индукции вращающегося поля до определенной величины; с увеличением размера конгломератов шлама, при одинаковом размере входящих в него ферромагнитных частиц, величина индукции магнитного поля, необходимая для их разрушения, снижается; с уменьшением размеров частиц конгломератов индукция поля, необходимая для разрушения связей конгломерата, увеличивается; увеличение числа частиц в конгломерате снижает значение индукции; степень разрушения конгломерата и измельчения его ферромагнитных частиц зависит от продолжительности воздействия индукции вращающегося электромагнитного поля.
Обсуждение и заключения. Предложенный индукционный метод позволяет исследовать влияние параметров электромагнитного поля на изменение состояния магнитовибрирующего слоя, а также оценить кинематические характеристики частиц ферромагнитной среды в магнитовибрирующем слое.

Ключевые слова: шлифовальный шлам, индукция, магнитовибрирующий слой, вращающееся электромагнитное поле, конгломерат, ферромагнитные частицы, разрушение, измельчение.

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90006.

Благодарности. Авторы благодарят руководителей предприятий Ростовской области: ПАО «ТАНТК им. Г. М. Бериева», ОАО «10-ГПЗ» за предоставленные образцы шламовых отходов шлифовального производства.

Для цитирования. Исследование процесса переработки конгломератов шлифовального шлама в устройствах с вращающимся электромагнитным полем / В. А. Лебедев, А. А. Ширин, Н. С. Коваль, Ю. М. Вернигоров // Advanced Engineering Research. — 2022. — Т. 22, № 4. — С. 338–345. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-338-345

Original article

Study on Processing Grinding Sludge Conglomerates in Devices with a Rotating Electromagnetic Field

Valeriy A. Lebedev, Andrey A. Schirin ✉, Nikolay S. Koval, Yuri M. Vernigorov
Don State Technical University, 1, Gagarin Sq., Rostov-on-Don, Russian Federation
✉ ANDREY.SHIRIN.94@yandex.ru

Introduction. The key stages of sludge processing technology are the destruction of conglomerates into metal and non-metal components, as well as the grinding of component particles to obtain secondary raw materials of the required granulometric composition. The use of a rotating electromagnetic field for processing grinding sludge makes it possible to exclude the application of various means of destruction and grinding, avoiding contact interaction of agglomerates and the walls of the working chamber. Thus, the material consumption of technical means is reduced, and the efficiency of the destruction process is increased. The study aimed at establishing the features and basic patterns of sludge waste processing in devices with a rotating electromagnetic field.

Materials and Methods. For the research, grinding sludge was used, which was a collection of conglomerates of arbitrary shape, consisting of 80-85 % of metal chips. An induction method was applied based on establishing the connection of the EMF induced in an induction sensor and the magnetic induction of a rotating electromagnetic field. The influence of induction on the nature of interaction between sludge particles in a rotating electromagnetic field was evaluated by changing the relative EMF signal induced in an inductive sensor.

Results. As a result of experimental studies conducted using the induction method, it has been found that the dynamic characteristics of sludge waste conglomerates depend on the induction of a rotating field to a certain value. With an increase in the size of sludge conglomerates, with the same size of ferromagnetic particles entering it, the magnitude of the magnetic field induction required for their destruction decreased. With a decrease in the particle size of conglomerates, the field induction required for the destruction of conglomerate bonds increased. An increase in the number of particles in the conglomerate reduced the value of induction. The degree of destruction of the conglomerate and the grinding of its ferromagnetic particles depended on the duration of the rotating electromagnetic field induction.

Discussion and Conclusions. The proposed induction method makes it possible to investigate the influence of electromagnetic field parameters on the change in the state of the magnetic vibrating layer, as well as to evaluate the kinematic characteristics of ferromagnetic medium particles in the magnetic vibrating layer.

Keywords: grinding sludge, induction, magnetic vibrating layer, rotating electromagnetic field, conglomerate, ferromagnetic particles, destruction, grinding.

Funding information. The research is done with the financial support from RFFI within the framework of scientific project no. 20-38-90006.

Acknowledgements. The authors would like to thank the heads of enterprises of the Rostov region: PJSC **“**Beriev Aircraft”, OAO “10-GPZ”, for the samples of slurry waste of grinding production provided.

For citation. V. A. Lebedev, A. A. Schirin, N. S. Koval, Yu. M. Vernigorov. Study on Processing Grinding Sludge Conglomerates in Devices with a Rotating Electromagnetic Field. Advanced Engineering Research, 2022, vol. 22, no. 4, pp. 338–345. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2022-22-4-338-345

Введение. Технология переработки одного из самых сложных видов отходов металлопроизводства — шлифовального шлама — с целью вторичного использования его компонентов в порошковой металлургии и литейном производстве требует выполнения ряда последовательных этапов: отделение технологической жидкости (ТЖ), сушка, разрушение конгломератов, измельчение и разделение твёрдых частиц шлама [1–10]. Последние два этапа переработки шламов, как показал проведённый анализ, являются наиболее трудоемкими, а

применяемые для их реализации технические средства и устройства, несмотря на их многообразие, малоэффективны по ряду технико-экономических показателей [1–15]. Последние достижения в области магнетизма позволяют решить эту проблему на качественно новом уровне, используя вращающееся электромагнитное поле (рис. 1).

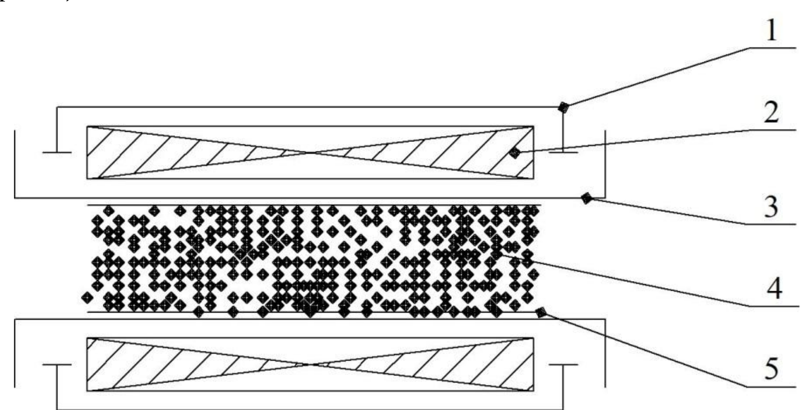


Рис. 1. Схема переработки шлама во вращающемся электромагнитном поле:
1 — корпус; 2 — индуктор; 3 — рабочая зона ; 4 — шлам; 5 — сменная втулка (рисунок авторов)

Применение вращающегося электромагнитного поля (ВЭМП) для переработки шлифовальных шламов позволяет исключить контактное взаимодействие конгломератов со стенками рабочей камеры и применение металлических бил или других средств разрушения и измельчения. Таким образом снижается материалоёмкость технических средств, повышается эффективность процессов разрушения конгломератов и измельчение металлических частиц шлама [16, 17].

С целью раскрытия особенностей и основных закономерностей переработки шламовых отходов в устройствах с вращающимся электромагнитным полем проведен комплекс теоретических и экспериментальных исследований, результаты которых представлены в данной статье.

Материалы и методы. Шлам, подлежащий разрушению и измельчению, представляет собой совокупность конгломератов произвольной формы, состоящих на 80–85 % из металлической стружки, что позволяет охарактеризовать конгломерат как твердое тело, обладающее ферромагнитными свойствами [14].

При нахождении конгломератов во вращающемся электромагнитном поле, характеризуемом индукцией B=Bv$cos\omega t$ и угловой скоростью ω, они совершают сложное движение, приводя систему в магнитовибрирующее состояние. При этом формируется магнитовибрирующий слой (МВС), в условиях которого происходит их контактное взаимодействие и, как следствие, разрушение и измельчение.

Энергетическое состояние конгломератов в магнитовибрирующем слое описывается зависимостью в виде:

$$E = \frac{1}{2\pi}\frac{\rho_m{}^2}{\omega^2}\left[\frac{B_v^2}{I} + \frac{1}{m}\left(\frac{\partial B_v}{\partial y}\right)^2\right], \text{ Дж}, \quad (1)$$

где p_m — магнитный момент; Ам^2; $\frac{dB}{dy}$ — градиент поля, А/м^2.

На основе уравнения (1) установлены энергетические условия разрушения конгломератов:

$$\frac{\rho_m{}^2}{\pi\omega^2}\left[\frac{B_v^2}{I} + \frac{1}{m}\left(\frac{\partial B_v}{\partial y}\right)^2\right] = E_{\text{адг}}, \quad (2)$$

где $E_{\text{адг}}$ — адгезионная прочность конгломератов, Дж.

Условие измельчения ферромагнитных частиц шлама со степенью $Z_u = D_{\text{Н}}/D_{\text{К}}$ исходя из (1) имеет вид:

$$\frac{1}{2\pi}\frac{\rho_m{}^2}{\omega^2}\left[\frac{B_v^2}{I} + \frac{1}{m}\left(\frac{\partial B_v}{\partial y}\right)^2\right] + \frac{1}{2\pi}\frac{\rho_M{}^2}{\omega^2}\left[\frac{B_v^2}{I} + \frac{1}{M}\left(\frac{\partial B_v}{\partial y}\right)^2\right] = \frac{\pi\sigma^2 D_{\text{к}}^3}{12E}(Z_u^3 - 1), \quad (3)$$

где σ — предел прочности при разрушении феромагнитных частиц; Па; $D_н$ и $D_к$ — начальный и конечный эквивалентные диаметры частиц, м; E — модуль упругости частицы, Па.

Для проведения исследований влияния электромагнитного поля на энергетическое состояние магнитовибрирующего слоя был применен индукционный метод (рис. 2), основанный на установлении связи ЭДС, наводимой в индукционном датчике с магнитной индукцией вращающегося электромагнитного поля.

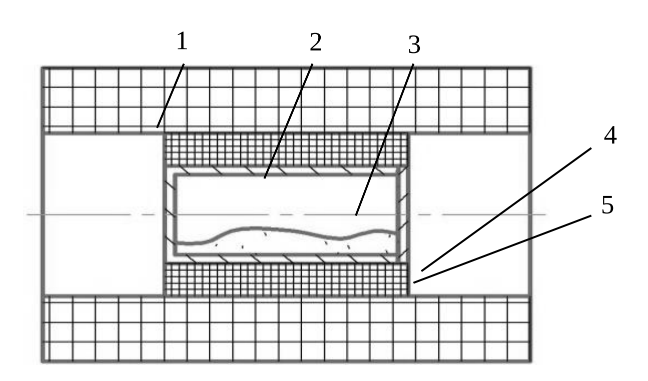


Рис. 2. Схема реализации исследований состояния магнитовибрирующего слоя во вращающемся электромагнитном поле индукционным методом: 1 — индуктор; 2 — индуктивная катушка; 3 — кювета; 4 — шлам; 5 — крышка кюветы (рисунок авторов)

В качестве датчика выбрана катушка индуктивности. Для создания катушки изготовлен каркас шириной (H) 25 мм и наружным радиусом (R_2) 17,5 мм. Обмоточный провод — ПЭЛ (ГОСТ 2 773–78) с диаметрами: по меди D_1 = 0,15 мм, в изоляции D = 0,18 мм. Площадь сечения провода S = 0,01767 мм^2. Измеренное сопротивление катушки составило 14,8 Ом. Индуктивность — 0,82 мГн. Общее число витков — 139, длина провода — 15,27 м. Расчетное сопротивление катушки (1 м — 0,99 Ом) R = 15,27×0,99 = 15,1 Ом.

Индуктивный датчик 2 и кювета 3 помещались в цилиндрическую рабочую зону устройства с вращающимся электромагнитным полем (рис. 1). Ток в цепи индуктивного датчика контролировался мультиметром и при различных режимах составлял 4,3–11,4 А. Индукционная ЭДС измерялась вначале без частиц шламовых отходов, а затем с исследуемыми образцами шламовых отходов при выбранных параметрах устройства с ВЭМП.

Конгломераты шламовых отходов во вращающемся электромагнитном поле под действием момента, стремящегося повернуть их вокруг центра масс, совершают с одной стороны вращательное движение, с другой — поступательное в направлении движения внешнего вращающегося электромагнитного поля. Таким образом, поведение магнитных моментов конгломератов под действием пондеромоторных сил можно охарактеризовать в плоскости измерительного витка индукционного датчика XOY как колебательно-вращательное и колебательно- поступательное движение по гармоническому закону в магнитном поле (рис. 3).

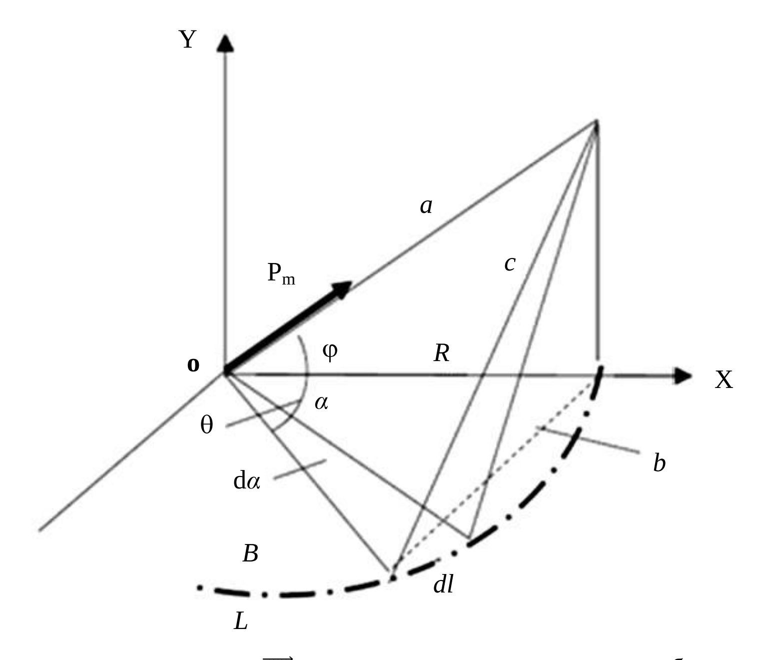


Рис. 3. Ориентация магнитного момента $\overrightarrow{p_m}$ в пространстве индукционного преобразователя (рисунок авторов)

Наведенная ЭДС, в соответствии с законом электромагнитной индукции, равна:

$$\varepsilon = -\frac{d\psi}{dt}, \qquad (4)$$

где $\psi = N\Phi$ — потокосцепление; N — число витков измерительной катушки.

Выразим магнитный поток через поверхность, ограниченную контуром витка индукционного преобразователя L с радиусом R, в следующем виде:

$$\Phi = BS_к, \quad (5)$$

где $S_к$ — площадь контура катушки; $S_к = \pi r^2$; r — средний радиус контура катушки, B — индукция вращающегося электромагнитного поля. При этом:

$$B = B_0. \quad (6)$$

Выражение для расчета ЭДС многовиткового индукционного преобразователя следующее:

$$\varepsilon = \frac{2}{3} \mathrm{N} B_0 \pi^2 R^2 f_1. \quad (7)$$

Оценка влияния индукции на характер взаимодействия между частицами шлама во вращающемся электромагнитном поле проводилась по изменению относительного сигнала ЭДС, наведенного в индуктивном датчике, согласно соотношению:

$$\frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{(\varepsilon - \varepsilon_0)}{\varepsilon_0}, \quad (8)$$

где ε и ε_0 — ЭДС в датчике со средой и без неё соответственно.

Результаты исследования. На рис. 4, 5 представлены результаты исследования индукционным методом влияния вращающегося электромагнитного поля на энергетическое состояние частиц шлама, а на рис. 6–8 — основные технологические закономерности процесса разрушения конгломератов в устройствах с вращающимся электромагнитным полем.

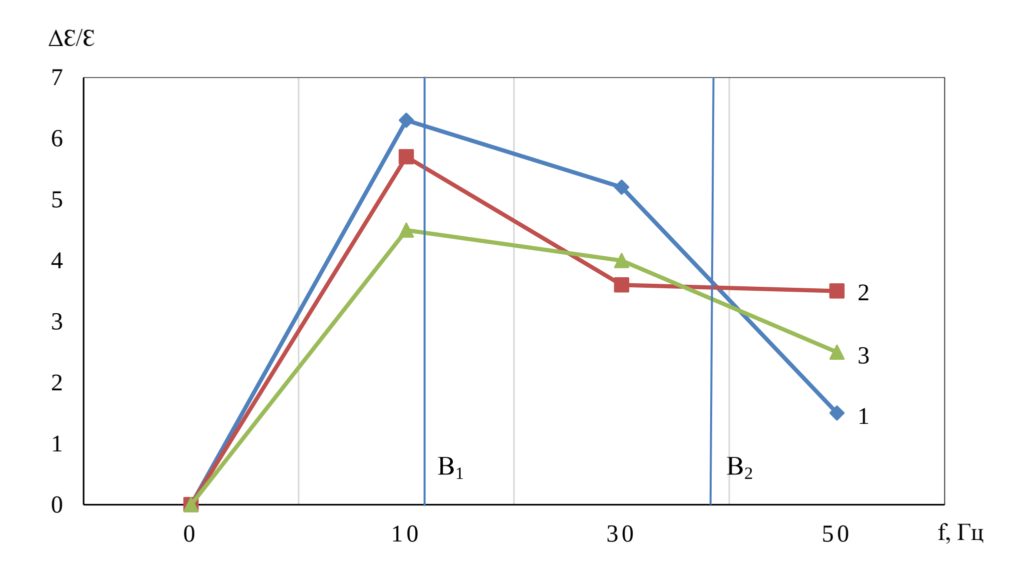


Рис. 4. Экспериментальная зависимость относительного сигнала $\Delta\varepsilon/\varepsilon$ от частоты питающего тока (f), определяющего индукцию вращательного электромагнитного поля при уровне загрузки рабочей зоны устройства ферромагнитной средой: 1 — 30 %; 2 — 50 %; 3 — 75 % (рисунок авторов)

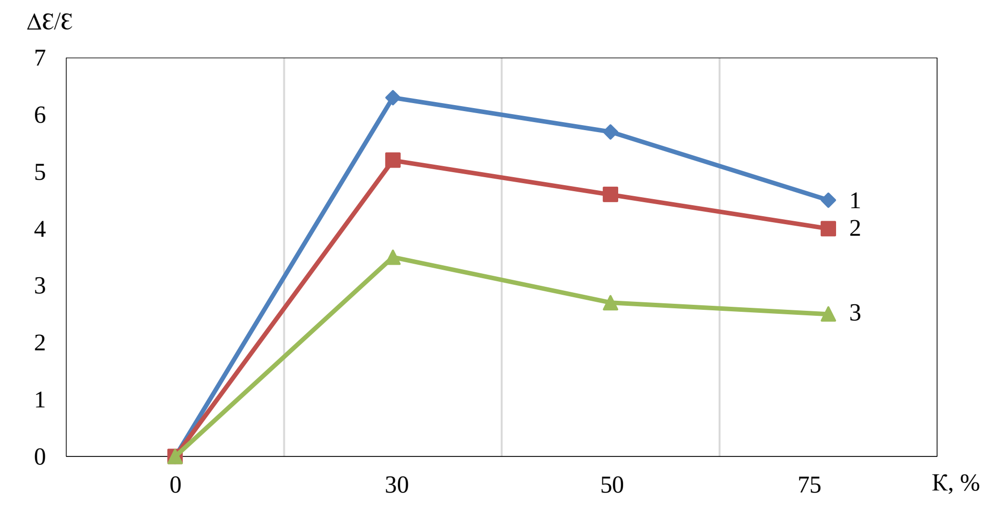


Рис. 5. Экспериментальная зависимость относительного сигнала Δε ⁄ε от коэффициента загрузки шлама в рабочую зону устройства с ВЭМП, определяющего индукцию вращательного электромагнитного поля: 1 — 10 Гц; 2 — 30 Гц; 3 — 50 Гц; (рисунок авторов)

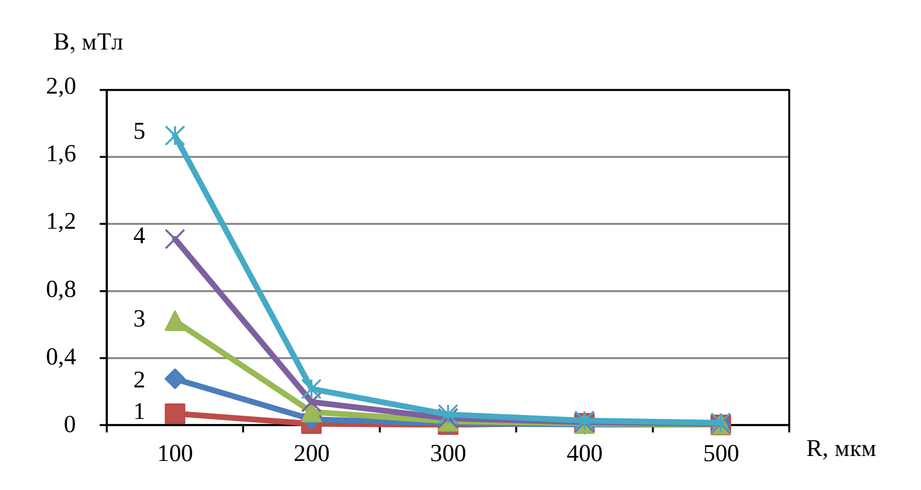


Рис. 6. Влияние размера конгломератов шлама на величину индукции магнитного поля, необходимой для их разрушения, при размере r частицы в конгломерате: 1 — 50 мкм; 2 — 40 мкм; 3 — 30 мкм; 4 — 20 мкм; 5— 10 мкм (рисунок авторов)

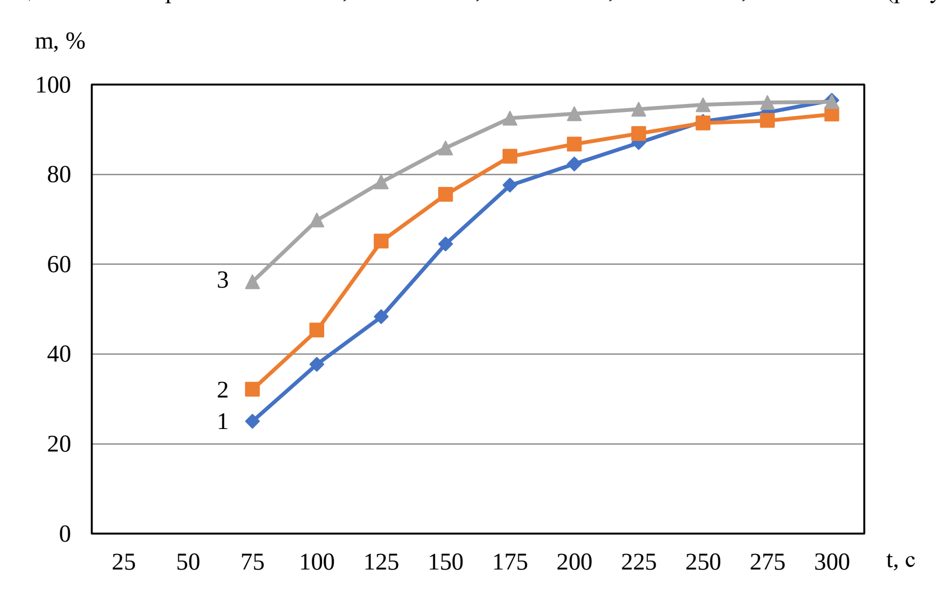


Рис. 7. Зависимость отделившегося абразива от времени при частотах выходного тока: 1 — 50 Гц; 2 — 30 Гц; 1 — 10 Гц (рисунок авторов)

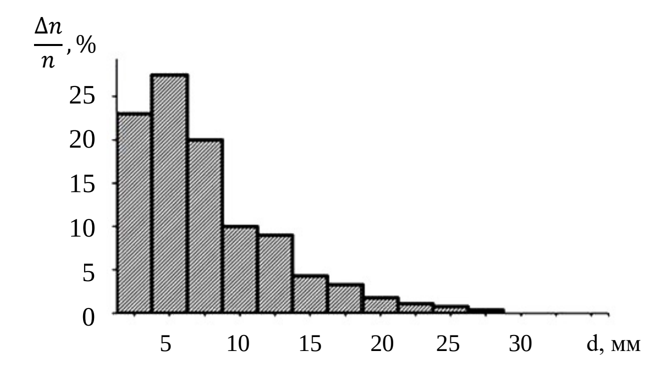


Рис. 8. Гистограмма распределения частиц по размерам через 5 минут воздействия магнитовибрирующего слоя (рисунок авторов)

Обсуждение и заключения. Проведенные с применением индукционного метода экспериментальные исследования наглядно показали, что динамические характеристики конгломератов шламовых отходов зависят от индукции вращающегося поля. Как показано на рис. 4, изменение индукции поля до значения B_1 способствует росту энергетической активности конгломератов в магнитовибрирующем слое. Процессы, обеспечивающие технологический эффект разрушения конгломератов шламовых отходов размером 10 мкм, протекают более интенсивно. Дальнейшее увеличение индукции от B_1 до B_2 приводит к снижению энергетической активности конгломератов в магнитовибрирующем слое, что и показал индукционный метод.

Это связано с тем, что при увеличении индукции уменьшается степень хаотизации конгломератов и из них начинают формироваться цепочные комплексы, образуя так называемые «магнитные струны», скорость и амплитуда колебаний которых меньше скорости и амплитуды колебаний отдельных конгломератов. При $B > B_2$ «магнитные струны» за счет роста магнитостатического взаимодействия принимают устойчивый характер, значительно снижающий эффект магнитовибрирования конгломератов шламовых отходов, практически сводя его к нулю при высоком уровне индукции вращающегося электромагнитного поля.

Результаты исследований, представленные на рис. 6–8, позволили сделать следующие выводы:

– с увеличением размера конгломератов шлама, при одинаковом размере входящих в него ферромагнитных частиц, величина индукции магнитного поля, необходимая для их разрушения, снижается, что согласуется с модельными представления энергетической оценки магнитовибрирующего слоя;

– с уменьшением размеров частиц конгломератов индукция поля необходимая, для разрушения связей конгломерата увеличивается; анализ кривых позволяет утверждать, что для конгломератов, состоящих из частиц радиусом менее 3 мкм, индукция превышает 2 – 4 мТл;

– предложенная модель для оценки энергетического состояния справедлива при разрушении менее устойчивых конгломератов;

– увеличение числа частиц в конгломерате снижает значение индукции, разрушающего его;

– степень разрушения конгломератов и измельчения его ферромагнитных частиц зависит от продолжительности воздействия индукции вращающегося электромагнитного поля.

Список литературы

1. Бабичев, А. П. Режимы работы устройства тонкого помола порошка $SmCo_5$ / А. П. Бабичев, Ю. М. Вернигоров, Н. Н. Фролова // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. — 2012. — № 6 (296). — С. 64–70.

2. Переработка производственных отходов и вторичных сырьевых ресурсов, содержащих редкие, благородные и цветные металлы / В. И. Букин, М. С. Игумнов, Вал. Вл. Сафонов, Вл. Вал. Сафонов. — Москва : Деловая столица, 2002. — 224 с.

3. Комаров, О. С. Переработка и использование отходов, содержащих цветные металлы / О. С. Комаров, Д. О. Комаров, Н. И. Урбанович. — Минск : БНТУ, 2018. — 114 с.

4. Рева, В. П. Механохимическая технология переработки отходов металлообработки быстрорежущей стали / В. П. Рева, Д. В. Моисеенко // Вестник машиностроения. — 2013. — № 2. — С. 51–56.

5. Переработка промышленных отходов металлопроизводства / В. А. Шаповалов, Ф. К. Биктагиров, В. Р. Бурнашев [и др.] // Современная электрометаллургия. — 2013. — № 1. — С. 40–44.

6. Каяк, Г. Л. Разработка технологии утилизации шлифовального шлама / Г. Л. Каяк, В. С. Фоменко, В. В. Андреев // Вестник инженерной школы Дальневосточного федерального университета. — 2017. — № 1. (30). — С. 60–67. https://doi.org/10.5281/zenodo.399007

7. Дьяконов, О. М. Шламы металлообрабатывающего производства / О. М. Дьяконов // Литье и металлургия. — 2010. — № 1–2. — С. 154–159.

8. Повстяной, А. Ю. Использование отходов промышленного производства для изготовления материалов конструкционного назначения / А. Ю. Повстяной, В. Д. Рудь // Устойчивое развитие. — 2014. — № 19. — С. 159–164.

9. Lebedev, V. A. Method of Calculating the Machines Drive with Screw Working Bodies Mounted from Tetrahedral Hollows / V. A. Lebedev, G. V. Serga, M. M. Chaava //In: Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering. — 2021. — P. 557–563. https://doi.org/10.1007/978-3-030-54814-8_64

10. The Study of Fine-Cleaning Treatment for Removal of Burrs in Screw Rotors / V. A. Lebedev, G. V. Serga, M. M. Chaava [et al.] // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2021. — Vol. 1029. — Art. 012001. https://doi.org/10.1088/1757-899X/1029/1/012001

11. Reliability of Centrifugal–Rotational Finishing by Steel Shot / M. A. Tamarkin, E. E. Tishchenko, D. V. Kazakov, A. G. Isaev // Russian Engineering Research. — 2017. — Vol. 37. — P. 326–329. https://doi.org/10.3103/S1068798X17040219

12. Creation of Regular Microreliefs by Multicontact Shock Vibratory Tool / D. P. Motrenko, A. P. Babichev, U. A. Babichev, G. A. Prokopez // In: Proceeding of 2nd Asia - Pacific Forum on Precision Surface Finishing and Deburring Technology, July, 22–24, 2002. — Seoul, Korea; 2002. — P. 246–249.

13. Vernigorov, Y. M. Simulation of Destruction of Ferromagnetic Materials Particles in Magneto-Vibrational Layer / Y. M. Vernigorov, K. K. Leletko, N. N. Frolova // World Science: Proceedings of Articles the International Scientific Conference. Czech Republic, Karlovy Vary – Russia, Moscow, June 29–30, 2017. — 2017. — P. 59–70.

14. Improving the Efficiency of Metal Production Waste Processing in Electromagnetic Field / V. A. Lebedev, Y. M. Vernigorov, A. A. Shirin [et al.] // Materials Science Forum. — 2021. — Vol. 1037. — P. 759–766. http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1037.759

15. Упрочнение длинномерных деталей во вращающемся электромагнитном поле / А. А. Кочубей, В. А. Лебедев, Ю. М. Вернигоров, И. В. Давыдова. — Ростов-на-Дону : ДГТУ, 2018. — 135 с.

16. Quality Improvement of Powder Products by Means of Magneto-Vibrational Destruction of Aggregates / V. Lebedev, Y. Vernigorov, G. Prokopets, L. Chunakhova // AIP Conference Proceedings. — 2019. — Vol. 2188. — P. 020007. https://doi.org/10.1063/1.5138381

17. Lebedev, V. A. The Use of the Rotating Electromagnetic Field for Hardening Treatment of Details / V. A. Lebedev, A. A. Kochubey, A. V. Kiricheck // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2017. — Vol. 177. — P. 012126. https://doi.org/10.1088/1757-899X/177/1/012126

Поступила в редакцию 10.10.2022.
Поступила после рецензирования 20.21.2022.
Принята к публикации 20.21.2022.

Об авторах:

Лебедев Валерий Александрович, профессор кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, профессор, ScopusID, ORCID, va.lebidev@yandex.ru

Ширин Андрей Александрович, аспирант кафедры «Технология машиностроения» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), ScopusID, ORCID, andrey.shirin.94@yandex.ru

Коваль Николай Сергеевич, доцент кафедры «Приборостроение и биомедицинская инженерия» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат технических наук, ResearcherID, ORCID, koval-nc@mail.ru

Вернигоров Юрий Михайлович, профессор кафедры «Физика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), доктор технических наук, профессор, ORCID, jvernigorov@donstu.ru

Заявленный вклад соавторов:

В. А. Лебедев, Ю. М. Вернигоров — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов. А. А. Ширин, Н. С. Коваль — проведение расчетов, подготовка текста, формирование выводов.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.